

Проверочные расчеты подтвердили отсутствие погрешности в результирующих показателях надежности, полученных с использованием программы «Струна» и модели № 3 (табл. 2).

Таблица 2

Результаты автоматизированного и ручного расчетов для узла 105

Способ расчёта	Модель №1: Узел - трансформатор		Модель №2: Ветвь – трансформатор		Модель №3: Идеальный трансформатор	
	Q, о.е.	L, год <sup>-1</sup>	Q, о.е.	L, год <sup>-1</sup>	Q, о.е.	L, год <sup>-1</sup>
«Струна»	$1,513 \cdot 10^{-4}$	$1,534 \cdot 10^{-1}$	$7,894 \cdot 10^{-5}$	$1,520 \cdot 10^{-1}$	$1,539 \cdot 10^{-4}$	$1,545 \cdot 10^{-1}$
Ручной	$1,513 \cdot 10^{-4}$	$1,534 \cdot 10^{-1}$	$8,795 \cdot 10^{-5}$	$1,523 \cdot 10^{-1}$	$1,539 \cdot 10^{-4}$	$1,545 \cdot 10^{-1}$

**Выводы.** Сопоставление результатов расчетов позволяет рекомендовать для практического использования модель №3, в которой исключены избыточные пути электроснабжения, как для смежных районов, так и для узлов рассматриваемой подстанции.

#### Список использованных источников

1. Вероятностное эквивалентирование при оценке структурной, режимной и балансовой надежности ЭЭС / И. Л. Кирпикова, О. М. Котов, В. П. Обоскалов // Проблемы развития и функционирования электроэнергетических систем. Екатеринбург : УГТУ. 2000. С. 159-165.
2. Котов О. М., Сандаков Я. В. Моделирование трехобмоточных трансформаторов в расчетах структурной надежности электрических сетей // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии : 4-ая науч.-практ. конф. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2015. С. 59-62.
3. Обоскалов В. П. Структурная надёжность электроэнергетических систем: учеб. пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2012. 196 с.

УДК 621.313.333

Сафин Н. Р., Прахт В. А., Дмитриевский В. А.  
Уральский федеральный университет  
emf2010@mail.ru

## МОНИТОРИНГ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МЕЖВИТКОВОМ ЗАМЫКАНИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы диагностики межвитковых замыканий асинхронных двигателей (АД) с использованием вольт-амперных характеристик. Представлены вольт-амперные характеристики исправного и неисправного электродвигателей. Приведены основные результаты исследований и анализ полученных данных.

В настоящее время вопросы энергосбережения, энергобезопасности и ресурсосбережения промышленных установок и технологических комплексов являются одними из актуальных задач национальной экономики. Асинхронные двигатели преобразовывают до 40 % вырабатываемой в РФ электроэнергии – около 400 ТВт·ч в год [1]. Во многих производственных этапах внезапный выход из строя электродвигателя может привести к аварийным ситуациям. Кроме того, эксплуатация находящихся в неудовлетворительном техническом состоянии электродвигателей приводит как к прямым финансовым потерям, связанным с непрогнозируемым выходом из строя оборудования и вызванным этим нарушением технологического процесса, так и к значительным до 5-7 % косвенным непродуктивным затратам электроэнергии, обусловленным повышенным электропотреблением [2]. В статистических исследованиях отмечают, что отказы АД происходят в двух узлах: в обмотке статора и в подшипниках [3]. Как правило, неисправности в обмотке статора обусловлены, и распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93 %, пробой межфазной изоляции – 5 %; пробой пазовой изоляции – 2 % [3]. В связи с этим возникает необходимость диагностирования межвитковых замыканий на ранней стадии их развития.

В качестве испытуемых машин для проведения опытов в лабораторных условиях были использованы АИР 71А2У2 (номинальная мощность 0,75 кВт, номинальная скорость вращения 2820 об/мин): АД с исправной обмоткой; АД с межвитковым замыканием 4 витков; АД с межвитковым замыканием 8 витков. Межвитковое замыкание моделировалось в фазе В. Подобные методики испытаний для исследования режимов АД с межвитковыми замыканиями отмечаются в работе [4]. Испытуемые АД поочередно питались непосредственно от трехфазной сети, эксперименты проводились на стенде, в котором тормозящий момент создавался индукционным динамометром. Момент на валу АД задавался равным номинальному  $M_H = 2,53 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Запись мгновенных значений токов и напряжений, выполнялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) QMBox20-16 с частотой дискретизации 50 кГц и измерительной платы с тремя датчиками токов LEMHX 02-Р и тремя датчиками напряжений LV25-PSP5. Скорость вращения испытуемого АД регистрировалось с помощью фототахометра «Mastech DT-2234А». Мгновенные значения токов и напряжений оцифровывались АЦП и записывались на компьютер для обработки в пакете Matlab.

В данной работе используются значения площадей вольт-амперных характеристик для диагностики работающих машин [4]. Определение данных значений для каждой фазы осуществлялся по следующим выражениям [4]:

$$F_{BAX}^A = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (i_a(t_j) - i_a(t_{j-1})) \cdot (u_a(t_j) + u_a(t_{j-1})), \quad (1)$$

$$F_{BAX}^B = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (i_b(t_j) - i_b(t_{j-1})) \cdot (u_b(t_j) + u_b(t_{j-1})), \quad (2)$$

$$F_{BAX}^C = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (i_c(t_j) - i_c(t_{j-1})) \cdot (u_c(t_j) + u_c(t_{j-1})), \quad (3)$$

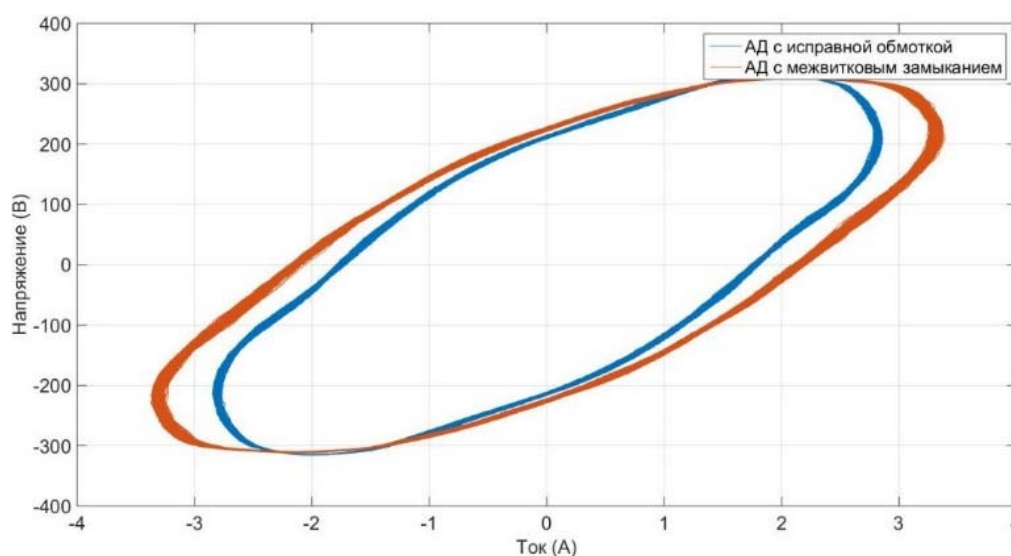
где  $i_a(t_{j-1})$ ,  $i_b(t_{j-1})$ ,  $i_c(t_{j-1})$  – мгновенные значения токов по фазам, измеренные в момент времени  $t_{j-1}$ ;  $u_a(t_{j-1})$ ,  $u_b(t_{j-1})$ ,  $u_c(t_{j-1})$  – мгновенные значения напряжений по фазам, измеренные в момент времени  $t_{j-1}$ ;  $i_a(t_j)$ ,  $i_b(t_j)$ ,  $i_c(t_j)$  – мгновенные значения токов по фазам, измеренные в момент времени  $t_j$ ;  $u_a(t_j)$ ,  $u_b(t_j)$ ,  $u_c(t_j)$  – мгновенные значения напряжений по фазам, измеренные в момент времени  $t_j$ ;  $N$  – число дискретных значений регистрируемого сигнала.

На рисунке представлены вольт-амперные характеристики при работе АД с исправной обмоткой и с замыканием 8 витков обмотки поврежденной фазы.

По полученным данным (таблица), можно отметить, что происходит увеличение площади вольт-амперной характеристики в поврежденной фазе В при работе АД с межвитковым замыканием.

Площади вольт-амперных характеристик по фазам

Испытуемая машина	Площадь вольт-амперной характеристики		
	$F_{BAX}^A$	$F_{BAX}^B$	$F_{BAX}^C$
АД исправный	56371	64125	59310
АД с замыканием 4 витков	58826	70648	58028
АД с замыканием 8 витков	71540	78224	54243



Вольт-амперная характеристика АД

При выполнении периодического мониторинга работающих машин можно вести сопоставление значений площадей вольт-амперных характеристик. При резком различии данных значений может быть дана рекомендация о выводе работающей машины в плановый ремонт. Возникновение поврежденных витков обуславливает повышение токовой нагрузки в исправных обмотках. Происходит увеличение асимметрии токов в обмотке статора. Как правило, эксплуатация АД с межвитковым замыканием может привести к междуфазному замыканию, или замыканию на землю, что уже приводит к полному выходу из строя электрической машины. Для подробного исследования с помощью вольт-амперных характеристик спектральных портретов многочастотных сигналов в трехфазных цепях можно обратиться к работе [5], в которой спектральный анализ многочастотного

анализа проводится с помощью опорного одночастотного сигнала. При несовпадении опорного сигнала по частоте с анализируемым сигналом, вольт-амперная характеристика получается не замкнутой. При совпадении частот, вольтамперная характеристика становится замкнутой, либо вырождается в прямую в случае совпадения фазы.

Контроль технического состояния АД позволяет снизить аварийные ситуации, обусловленные эксплуатацией машин с внутренними развивающимися дефектами и оптимизировать планово-предупредительные ремонтные работы.

#### Список использованных источников

1. Андреев В. А. Моделирование и исследование энергоэффективности асинхронных двигателей при вариациях режимных и конструктивных параметров: дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2009. 148 с.
2. Петухов В. С., Соколов В. А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31), [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (дата обращения: 30.10.15).
2. Котеленец Н. Ф., Кузнецов Н. Л. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». М. : Высш. шк., 1988. 232 с.
3. Diamini M., Barendse P.S., Khan A. Autonomous detection of interturn stator faults in induction motors // IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2013. P. 1700-1705.
4. Способ функционального контроля статических и динамических элементов трехфазных электротехнических и электромеханических систем: пат. 2298200 Рос. Федерация / Гольдштейн Е. И., Кац И. М. Оpubл. 27.04.2007, Бюл. № 12.
5. Гольдштейн Е. И., Сулайманов А. О., Бацева Н. Л. Спектральный анализ токов (напряжений) в однофазных и трехфазных цепях с помощью вольт-амперных характеристик // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 7. С. 80-82.

УДК 662.769

Сергеев П. А., Нешпоренко Е. Г., Сергеева А. А.  
Магнитогорский государственный технический университет  
[mr.pahen@gmail.com](mailto:mr.pahen@gmail.com)

## **СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА С ПОМОЩЬЮ ВТОРИЧНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА- КОНВЕРТЕРНОГО ГАЗА**

**Аннотация.** В работе рассмотрена энергоемкость доменно-конвертерного производства стали. На основе анализа выявлены основные недостатки доменного процесса, технологические способы уменьшения энергоемкости и повышение производительности выплавки чугуна. Перспективным технологическим способом является замена качественных руд на концентрат обожженной сидеритовой руды. Рассчитаны затраты теплоты ВЭР на подготовку сидеритовой руды.